

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
З КУРСУ «НЕЛІНІЙНІ ТА ПАРАМЕТРИЧНІ ЯВИЩА
В РАДІОТЕХНІЦІ»
для студентів факультету
"Автоматика та приладобудування"**

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету
протокол № 3 від 03.12.2008 р.

Харків
НТУ "ХПІ"
2012

Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу "Нелінійні та параметричні явища в радіотехніці" для студентів факультету "Автоматика та приладобудування" / Уклад. С.С. Козлов, О.Є. Андрєєв, С.І. Римар. – Х.: НТУ "ХПІ", 2012. – 52 с.

Укладачі: С.С. Козлов
О.Є. Андрєєв
С.І. Римар

Рецензент: В.В. Лізогуб

Кафедра радіоелектроніки

ВСТУП

Методичні вказівки з курсу «Нелінійні та параметричні явища в радіотехніці» виконується фронтальним методом, при якому академічна група, слідом за вивченням відповідної теми, виконує лабораторну роботу, що присвячена цій темі. Такий метод сприяє більш поглибленому засвоєнню матеріалу.

Мета даних лабораторних робіт полягає в тому, щоб дати студентам достатньо повне уявлення про нелінійні і параметричні явища в радіотехніці їх фізичні основи, їх математичні описи, основні методи аналізу і розрахунку ланцюгів, заснованих на нелінійних і параметричних явищах, в статичних і динамічних режимах роботи, тобто у створенні наукової бази для подальшого вивчення різних спеціальних електротехнічних дисциплін.

Роботи виконуються на лабораторних макетах з використанням генератора гармонічних і імпульсних коливань ГЗ-112/1, осцилографа С1-93, частотоміра ЧЗ-33, елек тронного мілівольтметра ВЗ-38, фазометра Ф2-1.

Методичні вказівки включають чотири лабораторні роботи.

Лабораторна робота 1

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНОГО РЕЗОНАНСНОГО ПІДСИЛЮВАЧА

1.1. Мета роботи

1. Дослідження нелінійного резонансного підсилення та помноження частоти.
2. Експериментальна перевірка методів аналізу нелінійних кіл при гармонічному впливі (метод Берга та метод п'яти ординат).
3. Дослідження впливу на роботу резонансного підсилювача напруги зміщення, амплітуди та форми вхідного сигналу.

1.2. Основні позначення, розрахункові формули та визначення

Для підсилювання коливань високої частоти, як модульованих, так і не модульованих, часто використовуються резонансні підсилювачі. Для одержання великої напруги на виході резонансного підсилювача на його вхід подають таку змінну напругу, яка заходить в нелінійну область вольт-амперної характеристики (ВАХ) підсилюючого елементу, і у вихідному струмі з'являються вищі гармоніки. Між тим частота цих гармонік вихідного струму значно відрізняється від резонансної частоти коливального контуру, який являє собою навантаження підсилюючого елементу, наприклад, біполярного транзистора (рис. 1).

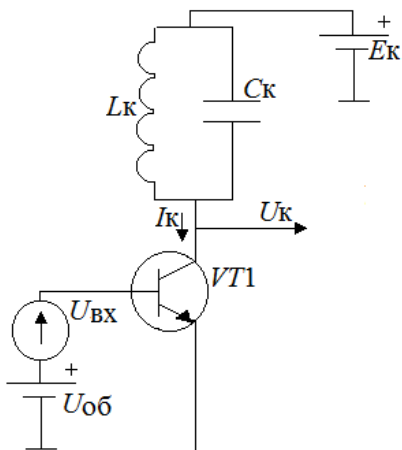


Рисунок 1

Тому вищі гармоніки вихідного струму I_k не позначаються на вихідній напрузі U_k і не спотворюють її форми. Звідси випливає, що вихідна напруга залежить в основному від першої гармоніки струму. Таким чином, для дослідження залежності напруги на виході U_n від напруги на вході $U_{вх}$ достатньо знайти залежність амплітуди першої гармоніки струму I_{k1} транзистора від амплітуди на його вході $U_{mвх}$. Ця залежність зветься коливальною характеристикою підсилюючого елемента. При полігональній апроксимації ВАХ транзистора ця характеристика визначаються як

$$I_1 = I_{mk} \cdot \alpha_1(\theta), \quad (1.1)$$

де I_{mk} – амплітуда імпульсу вихідного струму, $\alpha_1(\theta)$ – функція Берга для першої гармоніки струму, θ – кут відсічки при наданому значенні напруги $U_{об}$, який знаходиться зі співвідношення

$$\cos \theta = \frac{U_{поч} - U_{об}}{U_{mвх}}, \quad (1.2)$$

де $U_{поч}$ – напруга відкривання транзистора.

При апроксимації ВАХ поліномом залежність I_1 від $U_{mвх}$ визначається формулою

$$I_1 = a_1 U_{mвх} + \frac{3}{4} a_3 U_{mвх}^3 + \frac{5}{8} a_5 U_{mвх}^5 + \dots, \quad (1.3)$$

де a_i – коефіцієнти полінома.

При аналізі схеми на рис. 1 треба враховувати, що зі зростанням струму I_1 зростає й амплітуда першої гармоніки вихідної напруги U_{mk1} . При максимальному значенні імпульсу струму I_{mk} і струму першої гармоніки I_1 відповідає мінімальному миттєвому значенню напруги між колектором і емітером транзистора. При цьому транзистор може зайти в так званий насичений режим роботи, який супроводжується появою характерних провалів в імпульсах струму I_k (рис. 2).

Такий режим підсилювача зветься перенапруженням, при цьому амплітуда першої гармоніки вихідного струму I_1 не зростає із зростанням амплітуди $U_{mвх}$, що викликає обмеження зросту коливальної характеристики (рис. 3).

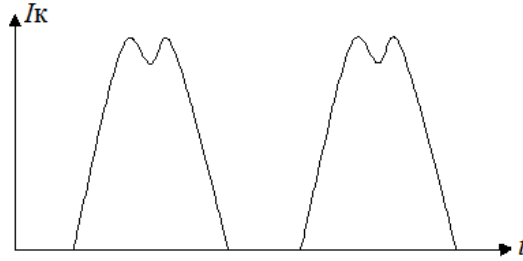


Рисунок 2

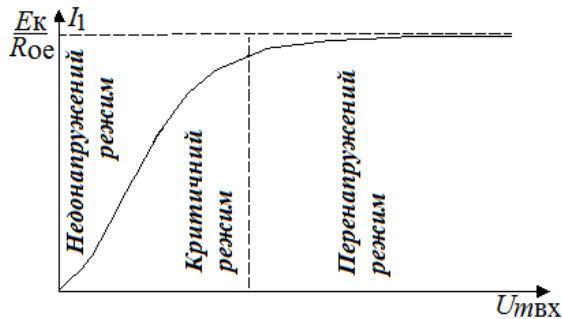


Рисунок 3

У недонапруженому режимі I_1 зростає із зростанням U_{mBX} , а умовна межа між перенапруженим і недонапруженим режимами зветься критичною. При визначенні режиму роботи підсилювача можна приблизно вважати, що

$$I_1 R_{oe} \approx E_k, \quad (1.4)$$

де R_{oe} – резонансний опір коливального контуру.

До коливальної характеристики ставляться різні вимоги залежно від призначення підсилювача. Так, при підсилюванні сигналів з постійною амплітудою (наприклад, ЧМ- або ФМ- коливання) лінійність коливальної характеристики не потрібна. Якщо підсилюються амплітудно-модульовані коливання, то лінійність необхідна. У першому випадку краще використовувати перенапружений режим, а в другому – недонапружений. Лінійність коливальної характеристики в недонапруженому режимі можна забезпечити доцільним вибором типу підсилюючого елемента і режиму його роботи. Наприклад, якщо можна використати полігональну апроксимацію його ВАХ, то вибирати $U_{06} = U_{поч}$, тому що в цьому випадку

$$\cos \theta = \frac{U_{\text{почат}} - U_{06}}{U_{\text{мвх}}} = 0, \quad (1.5)$$

кут відсічки $\theta = 90^\circ$ при будь-якій $U_{\text{мвх}}$ і коливальна характеристика $I_1 = f(U_{\text{мвх}})$ буде лінійною. Якщо ВАХ апроксимована ступінчастим поліномом, то коливальна характеристика лінійна і дорівнює $I_1 = a_1 U_{\text{мвх}}$ при $a_3, a_5, a_7, \dots = 0$. Парні коефіцієнти a_0, a_2, a_4, \dots можуть не дорівнювати нулю.

Якщо коливальний контур настроїти на одну з вищих гармонік вихідного струму I_k , то система, яку подано на рис. 2, буде працювати як помножувач частоти. Амплітуда вихідної напруги в цьому випадку знаходиться як

$$\theta_{\text{opt}} \approx \frac{120}{i}. \quad (1.6)$$

1.3. Опис лабораторного пристрою

Лабораторна установка включає:

1. Спеціалізований лабораторний макет.
2. Генератор гармонічних і імпульсних коливань ГЗ-112/1.
3. Осцилограф С1-93.

Принципова схема нелінійного підсилювача наведена на рис. 4. Крім схеми, на лицевій панелі лабораторного макета розташовані:

- * органи управління для регулювання режиму транзистора щодо постійного струму;
- * вимірювальні прилади для контролю значень постійних струмів та напруги у схемі;
- * гнізда для під'єднання зовнішніх вимірювальних приладів (осцилограф, генератор);
- * зображення статичної характеристики транзистора $I_k(U_6)$ та графіків функції Берга.

Для зручності зняття копій з графіків передбачено їхнє підсвітлювання, що вмикається за допомогою кнопки "Подсвет".

Міліамперметри, які розташовані на вертикальній панелі лабораторного макета, дозволяють вимірювати постійні складові струму бази I_{06} (у межах $0 - 0,1 \text{ мА}$) та струму колектора $I_{0к}$ (в межах $0 - 0,25 \text{ мА}$).

Вольтметр, який розташований у правій частині вертикальної панелі макета, дозволяє вимірювати постійні складові напруги $U_{0к}$ (у межах $0 - 20$ В), або напруги $U_{0б}$ (у межах $0 - 2$ В). Режим вимірювання визначається положенням тумблера, що знаходиться під вольтметром.

Для встановлення стрілки вольтметра на “0” при вимірюванні напруги на базі транзистора передбачена кнопка (без фіксації) “СТ Ø $U_{0б}$ ” і ручка, що знаходиться поряд з нею.

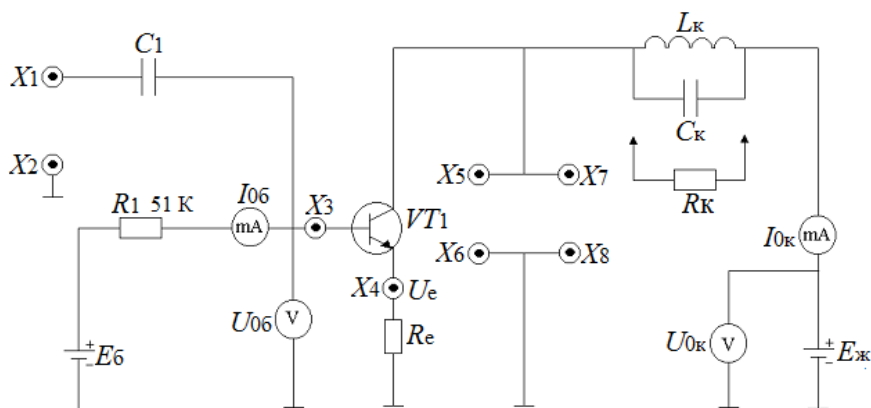


Рисунок 4

Верхній рядок кнопок дозволяє підключити до кола колектора транзистора або коливальний контур із значеннями ємності C_k , що дорівнюють 0,9; 1,1; 1,4; 1,8 нФ, або резистор R_k з опором 1 кОм.

Регулювання “ $E_б$ ” дозволяє виміряти напругу зміщення.

Резистор R_1 у колі бази транзистора має опір 51 кОм, а в колі емітера – 500 Ом.

Через розподільний конденсатор C_1 з ємністю 10 мкФ на базу транзистора може бути подана напруга сигналу з генератора ГЗ-112/1.

Для запобігання зіпсування транзистора при занадто великому вхідному сигналі в макеті передбачена схема захисту від перевантаження.

1.4. Розрахункове завдання

- Відповідно до номера робочої бригади з табл. 1.1 вибрати:

- * f_p – резонансну частоту коливального контуру;
- * C_k – ємність коливального контуру;
- * Q – добротність коливального контуру;
- * E_k – напругу джерела живлення;
- * $U_{0б}$ – постійну напругу на базі транзистора.

$$C_k^* = C_k + C_{\text{пар}},$$

$$C_{\text{пар}} \approx 500 \text{ пФ}.$$

Таблиця 1.1

Параметр № бригади	f_p , кГц	C_k , нФ	Q	E_k , В	$U_{0б}$, В
1	35,5	1,5	19,1	15	0,6
2	32,75	1,8	18	15	0,5
3	38,5	1,2	20,3	15	0,4
4	24,7	0,91	21,25	15	0,4
5	35,5	1,5	19,1	15	0,5
6	38,5	1,2	20,3	15	0,6
7	42,7	0,91	21,25	15	0,7
8	35,5	1,5	19,1	15	0,8

2. Для обраних параметрів коливального контуру розрахувати його еквівалентний опір при резонансі R_{0e} .

3. Виконати полігонну апроксимацію характеристики транзистора (рис. 5) $I_k(U_b)$ і визначити $U_{\text{поч}}$ – напругу відсічення струму колектора.

4. Розрахувати для заданих у таблиці 1 напруги і знайденого R_{0e} коливальну характеристику $U_{mk1}(U_{mб})$, де U_{mk1} – амплітуда 1-ї гармоніки напруги на колекторі і $U_{mб}$ – амплітуда напруги на базі транзистора. Розрахунки провести в такій послідовності:

5. Задати амплітуди напруги на базі $U_{mб}$ з кроком 0,1 – 0,2 В. Початкове значення цієї напруги повинно відповідати умові $U_{mб\text{поч}} \approx U_{\text{поч}} - U_{0б}$, кінцеве значення повинно бути таким, щоб $U_{mk1} \geq E_k$ (умова переходу до перенапруженого режиму).

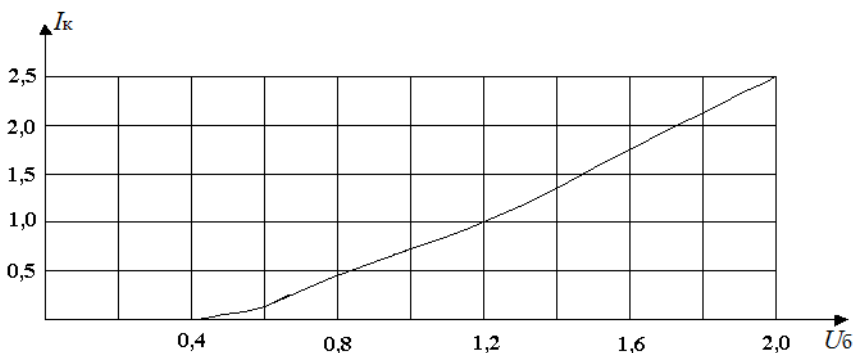


Рисунок 5

6. Визначити максимальну миттєву напругу на базі транзистора при заданому $U_{мб}$:

$$U_{б\max} = U_{0б} + U_{мб} . \quad (1.6)$$

7. За характеристикою транзистора $I_K(U_Б)$ знайти амплітуду імпульсу струму колектора $I_{мк}$.

8. Визначити кут відсікання для заданого значення $U_{мб}$:

$$\theta = \arccos \frac{U_{\text{поч}} - U_{0б}}{U_{мб}} . \quad (1.7)$$

9 По графіку функцій Берга визначити коефіцієнт $\alpha_1(\theta)$.

10 Розрахувати амплітуду першої гармоніки напруги на колекторі

$$U_{мк1} = I_{мк} \cdot R_{oe} \cdot \alpha_1(\theta) . \quad (1.8)$$

11. Результати розрахунків занести до табл. 1.2.

Таблиця 1.2

$U_{мб}$, В							
$U_{мб\max}$, В							
$I_{мк}$, мА							
θ , град							
$\alpha_1(\theta)$							
$U_{мк1}$, В							

12. Використовуючи розраховану коливальну характеристику і застосовуючи лінійну інтерполяцію, визначити значення $U_{mб}$, яке відповідає критичному режимові нелінійного резонансного підсилювача, маючи на увазі, що в цьому режимі

$$U_{mk1} \approx E_k - 0,5 B. \quad (1.9)$$

Розрахувати для критичного режиму кут відсікання θ .

13. Визначити, використовуючи метод Берга, амплітуди напруги на колекторі в режимі подвоєння, потроєння й збільшення вчетверо частоти при значеннях $U_{mб}$ та θ , які розраховані в п. 1.4.12. Для цього:

14. За графіками функції Берга знайти значення $\alpha_1(\theta)$, $\alpha_2(\theta)$, $\alpha_3(\theta)$ і $\alpha_4(\theta)$.

15. Розрахувати постійну складову струму колектора і амплітуди його перших гармонік:

$$I_{ki} = \alpha_i I_{mk}, \quad i = 0, 1, 2, 3, 4. \quad (1.10)$$

16. Знайти амплітуди напруги на колекторі в режимі помноження частоти:

$$U_{mki} = I_{ki} \cdot R_{oe}, \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (1.11)$$

17. Результати розрахунків занести до таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

Параметр	0	1	2	3	4
$\alpha_1(\theta)$					
I_{ki} , мА					
U_{mki} , В					

18. Для порівняння отриманих результатів розрахувати амплітуди напруги на колекторі транзистора в режимі помноження частоти, використовуючи метод п'яти ординат*. Для цього:

* Цей метод використовувати тільки якщо $\theta > 90^\circ$.

19. За характеристикою транзистора $I_K(U_{\text{б}})$ при заданому $U_{\text{об}}$ і знайденому значенні $U_{m\text{б}}$, яке відповідає критичному режиму, визначити струми i_{min} , i_2 , i_0 , i_1 , i_{max} (див. рис. 6). Значення цих струмів звести до таблиці 1.4.

Таблиця 1.4

Струми	i_{min}	i_2	i_0	i_1	i_{max}
Значення в мА					

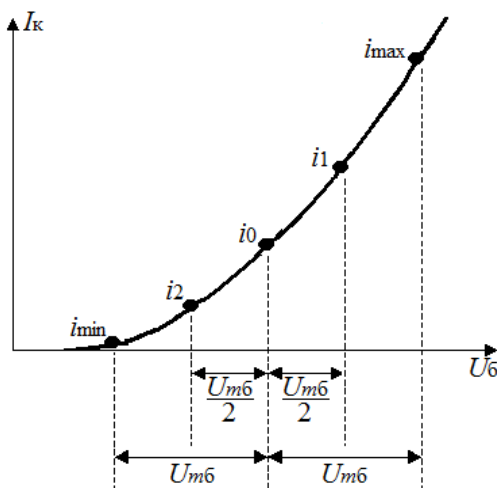


Рисунок 6

20. Знайти постійну складову та амплітуди перших чотирьох гармонік імпульсу струму колектора:

$$I_{0\kappa} = \frac{1}{6}[(i_{\text{max}} + i_{\text{min}}) + 2(i_1 + i_2)], \quad (1.12)$$

$$I_{\kappa 1} = \frac{1}{3}[(i_{\text{max}} - i_{\text{min}}) + (i_1 - i_2)], \quad (1.13)$$

$$I_{\kappa 2} = \frac{1}{4}[(i_{\text{max}} + i_{\text{min}}) - 2i_0], \quad (1.14)$$

$$I_{\kappa 3} = \frac{1}{6}[(i_{\max} - i_{\min}) - 2(i_1 - i_2)], \quad (1.15)$$

$$I_{\kappa 4} = \frac{1}{12}[(i_{\max} + i_{\min}) - 4(i_1 + i_2) + 6i_0]. \quad (1.16)$$

21. Визначити амплітуди напруги на колекторі в режимі помноження частоти за формулою (1.11).

22. Результат розрахунку занести в табл. 1.5 та порівняти данні табл. 1.3 і табл. 1.5.

Таблиця 1.5

Параметр	0	1	2	3	4
$I_{\kappa i}$, мА					
U_{mk_i} , В					

1.5. Порядок виконання експериментальної частини


1. Забезпечити критичний (основний) режим роботи нелінійного резонансного підсилювача при обраних параметрах коливального контуру та напрузі E_K і U_{06} . Для цього:

- * Підключити генератор високочастотних гармонічних коливань до клем X1-X2 (“ $U_{вх}$ ”). Встановити регулювання рівня сигналу вихідної напруги генератора в нульове положення.

- * Підключити вхід І каналу осцилографа CI-93 до клем X3-X6, а II – до X7-X8.

- * Встановити коефіцієнт відхилення K_y І каналу рівним 0,2 – 0,5 В/діл, а другого – 5 В/діл.

- * Встановити коефіцієнт відхилення променя від горизонталі K_x в межах (5 – 10) μ S/діл.

- * Синхронізація осцилографа – внутрішня (натиснути кнопки “Внутр. Г” та “”), розгортка автоматична.

- * Натиснути кнопку перемикача режиму роботи осцилографа “ $\rightarrow \rightarrow$ ”.

- * Встановити обране значення ємності контуру C_K і напруги E_K , натискаючи відповідні кнопки на горизонтальній панелі макета.

* Провести регулюванням “Уст. Ø U_{06} ” (при натиснутій кнопці) встановлення на “0” стрілки вольтметра в режимі вимірювань U_{06} .

* Встановити ручкою “ E_6 ” обране значення ємності постійної напруги на базі U_{06} .

Поступово збільшуючи амплітуду вхідного сигналу, добитись того, щоб $U_{mk} \approx (0,3-0,5)E_k$.

Підстроїти частоту коливань генератора за максимальною напругою на колекторі і за його фазовим зсувом відносно напруги на базі. Цей фазовий зсув повинен дорівнювати 180° .

2. Переключити I канал осцилографа до клем Х4-Х6 при $K_y = (0,2-0,5)$ В/діл і спостерігати форму напруги на резисторі R_c , яка співпадає з формою струму емітера*, повільно збільшувати амплітуду вхідного сигналу. Підтримувати раніше задане значення напруги U_{06} за допомогою ручки “ E_6 ”.

Встановити критичний режим роботи підсилювача при появі характерної “зазубрини” на вершині імпульсу струму емітера. Цей режим прийняти за основний.

3. Провести вимірювання параметрів нелінійного резонансного підсилювача. Для цього:

○ Замалювати осцилограму імпульсу струму емітера у критичному режимі та визначити його розмір. Ціна одного ділення осцилографічної сітки по вертикалі при зміні струму $K_{yI} = 2 \cdot K_y$.мА/діл. В подальшому можна враховувати, що розмір імпульсу струму емітера

$$I_{me} \approx I_{mk}.$$

○ Визначити за формулою (1.17) кут відсічення θ , використовуючи осцилограму струму емітера (див. рис. 7):

$$\theta = \frac{t_{\text{имп}}}{T} \cdot 180^\circ. \quad (1.17)$$

○ За осцилограмою напруги на базі (на I Y-каналі) виміряти напругу U_{m6} .

* В подальшому будемо називати осцилограму на клеммах Х4-Х6 “осцилограма струму емітера” або, залежно від кута відсічки, “осцилограма імпульсу струму емітера”.

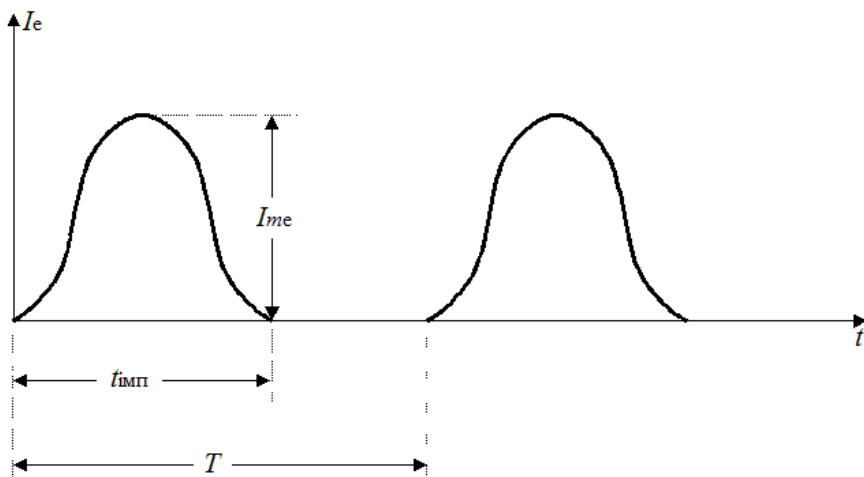


Рисунок 7

○ Визначити постійну складову струму колектора $I_{0к}$ за показниками відповідного міліамперметра.

○ Перевірити підключення входу II Y -каналу до клем $X7$ - $X8$ ($K_y = 5 \text{ В/діл}$) та виміряти амплітуду 1-ї гармоніки напруги на колекторі U_{mk1} у критичному режимі.

4. Дослідити нелінійний резонансний підсилювач у режимі помноження частоти. Для цього:

Зменшуючи частоту коливань генератора, настроїти коливальний контур послідовно на другу, третю та четверту гармоніки імпульсу вхідного струму за максимумом напруги на колекторі. Зарисувати осцилограми напруги на базі та колекторі транзистора в кожному із зазначених випадків та виміряти U_{mk2} , U_{mk3} , U_{mk4} .

5. Результати вимірювань у п.п. 2 і 3 звести до табл. 1.6 і порівняти їх з розрахунковими даними відповідних параметрів.

Таблиця 1.6

$U_{0б}$, В	$U_{mб}$, В	θ , град	I_{mk} , мА	$I_{0к}$, мА	U_{mk1} , В	U_{mk2} , В	U_{mk3} , В	U_{mk4} , В

6. Дослідити вплив постійної напруги на базі на роботу нелінійного резонансного підсилювача. Для цього:

- * Встановити частоту коливань генератора рівною резонансній частоті контуру (див. п. 1.3).

- * Змінити напругу $U_{0б}$ на 0,1 В у бік зменшення, а потім – у бік збільшення відносно вихідного значення. Зарисувати в кожному з цих випадків осцилограму струму емітера, а також виміряти: I_{mk} , θ , U_{mk1} .

7. Дослідити вплив напруги джерела живлення E_k на роботу нелінійного резонансного підсилювача. Для цього кнопками “ E_k ” на лицевій панелі лабораторного макета встановити напругу живлення спочатку 20 В, а потім 10 В. Для кожного з цих випадків замалювати осцилограму струму емітера, а також виміряти I_{me} , θ , U_{mk1} .

Увага! При проведенні експерименту постійна напруга на базі і амплітуда вхідного сигналу $U_{mб}$ повинна відповідати вихідному режиму!

8. Дослідити вплив відхилення частоти вхідного сигналу відносно резонансної частоти контуру. Для цього:

- Встановити надане в табл. 1.1 вихідне значення напруги E_k .

- Змінити частоту коливань генератора спочатку в бік зменшення, а потім – у бік збільшення відносно резонансної частоти контуру так, щоб амплітуда напруги на колекторі зменшилася приблизно в $\sqrt{2}$ раз відносно її значення при резонансі.

Зарисувати осцилограми напруги на базі й колекторі, а також струму емітера в кожному з цих випадків. Звернути увагу на фазовий зсув між ними.

Виміряти та записати при цьому U_{mk1} і I_{mk} .

1.6. Зміст звіту

Звіт повинен уміщувати в собі принципову схему нелінійного резонансного підсилювача, що досліджувався, результати розрахунків, подані у вигляді таблиці, осцилограми струму емітера та напруг на базі й колекторі транзистора та результати їх вимірювання, які відповідають виконаним експериментам, порівняння теоретичних і експериментальних результатів та пояснення причин їх можливих розбіжностей.

1.7. Контрольні запитання

1. Назвіть способи апроксимації характеристик нелінійних елементів, які частіше використовуються.

2. Поясніть принцип роботи нелінійного резонансного підсилювача.

3. Назвіть методи визначення амплітуд гармонік колекторного струму та вкажіть галузь призначення того чи іншого методу.

4. Дайте визначення кута відсічення вихідного (колекторного) струму.

5. Як залежить кут відсікання колекторного струму від постійної складової напруги на базі та від амплітуди гармонічного впливу.

6. Нарисуйте часові діаграми струму колектора (емітера) та напруги на колекторі в недонапруженому та перенапруженому режимах роботи нелінійного резонансного підсилювача. Як зміняться ці діаграми, якщо розладнати коливальний контур?

7. Дати визначення критичному режиму роботи нелінійного резонансного підсилювача. Яким чином можна отримати критичний режим експериментальним шляхом?

8. Як залежить напруженість режиму роботи нелінійного резонансного підсилювача при зміні: постійної складової напруги на базі $U_{0б}$, амплітуди гармонічного впливу $U_{mб}$, напруги джерела живлення E_k , еквівалентного опору коливального контуру при резонансі R_{oe} ?

9. Чому при зміні амплітуди вхідного сигналу $U_{mб}$ у схемі, що досліджується, змінюється постійна складова напруги на базі $U_{0б}$? Як можна позбавитися цього явища?

10. Дайте визначення коливальної характеристики нелінійного резонансного підсилювача та нарисуйте її у вигляді графіка.

11. Як змінюється коливальна характеристика при зміні $U_{0б}$, E_k , R_{oe} ? Дайте пояснення цим змінам.

12. Який фізичний принцип роботи нелінійного помножувача частоти? Які умови необхідно виконати для того, щоб отримати високу кратність помноження?

13. Чому при високій кратності помноження частоти амплітуда коливань на колекторі зменшується в межах періоду впливу? Як можна поменшити цей ефект?

Лабораторна робота 2

РЕЗОНАНС У КОНТУРІ З НЕЛІНІЙНОЮ ЄМНІСТЮ

2.1. Мета роботи

1. Дослідження резонансних явищ у паралельному коливальному контурі з нелінійною ємністю (варикапом).
2. Зняття частотних та амплітудних характеристик кола, що вміщує нелінійний контур.

2.2. Основні позначення, розрахункові формули та визначення

Схема нелінійного досліджуваного контуру подана на рис. 8 Роль нелінійного елемента виконує бар'єрна ємність варикапа, вольт-фарадна характеристика якого зображена на рис. 9.

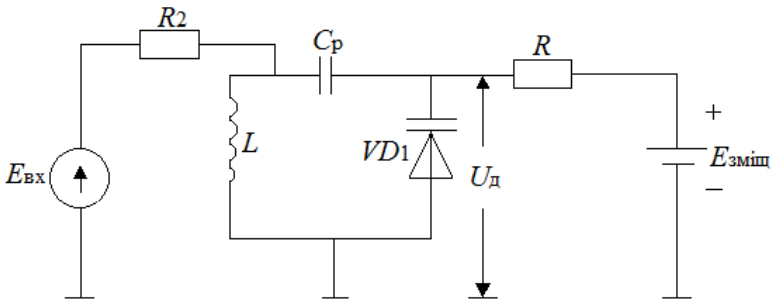


Рисунок 8

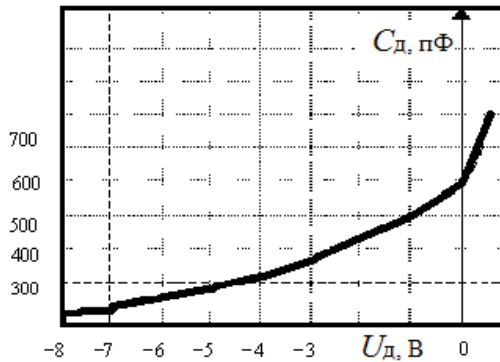


Рисунок 9

Припускається, що на схемі (рис. 8) опори R_{Γ} і R значно перебільшують еквівалентний резонансний опір контуру $R_{\text{оє}}$. Крім того, опір R суттєво менший за опір варикапа при зворотному вмиканні $p-n$ переходу $R_{\text{Дзв}}$, відокремлююча ємність C_p у багато разів більша за максимальну ємність варикапа.

Напруга на варикапі має дві складові:

$$U_{\text{Д}} = U_{\approx} + U_{\text{зміщ}} , \quad (2.1)$$

де $U_{\text{зміщ}}$ – постійна складова (напруга зміщення), U_{\approx} – змінна складова.

Враховуючи достатньо високу частотну вибірковість коливального контуру, можна вважати, що змінна складова напруги на варикапі має гармонічний характер.

$$U_{\approx} = U_m \cos \omega t . \quad (2.2)$$

У цьому випадку аналіз стаціонарних процесів у нелінійному контурі звичайно, проводиться квазілінійним методом, а нелінійні властивості варикапа враховуються введенням середньої за період напруги зміни диференціальної ємності $C_{\text{Д}}$:

$$C_{\text{сєр}}(U_m) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} C_{\text{Д}}(U_{\approx}) \cdot d(\omega t) . \quad (2.3)$$

Величина середньої ємності є функція амплітуди U_m і її краще за все визначати методом трьох ординат (рис. 10).

За прийнятими на рис. 10 позначеннями середня ємність варикапа

$$C_{\text{сєр}}(U_m) = \frac{C_{\text{max}} + C_{\text{min}}}{4} + \frac{C_0}{2} . \quad (2.4)$$

При збільшенні U_m C_0 залишається постійною, а збільшення C_{max} перевищує за абсолютною величиною зменшення C_{min} . Тому з ростом U_{min} також зростає $C_{\text{сєр}}$.

Збільшення $C_{\text{сєр}}$ призводить до зменшення резонансної частоти контуру:

$$f_p = \frac{1}{2\pi \sqrt{L(C_{\text{сєр}} + C_{\text{пар}})}} , \quad (2.5)$$

де $C_{\text{пар}}$ – паразитна ємність контуру, яка залежить від міжвиткової ємності котушки індуктивності, монтажною ємності та ємності навантаження, що підключається безпосередньо до контуру.

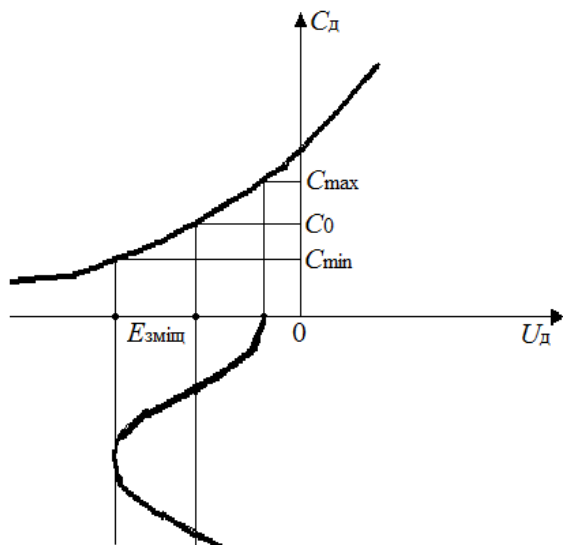


Рисунок 10

Зменшення f_p призводить до зміщення вліво і деформації частотних характеристик контуру, що зображені на рис. 11.

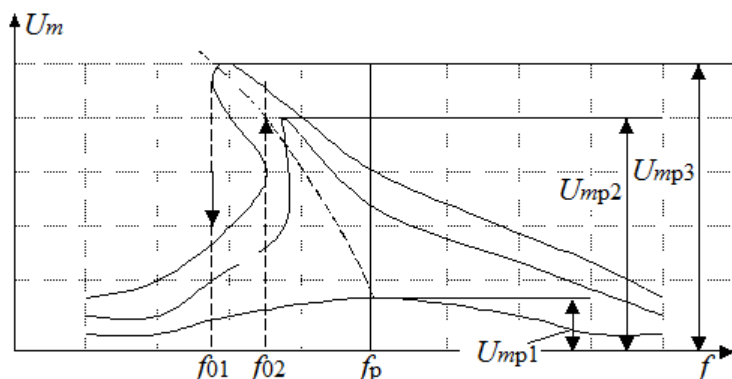


Рисунок 11

При достатньо великих значеннях $E_{\text{вх}}$ залежність $U_m(f)$ у деякій області частот стає трьохзначною, що призводить до виникнення гістерезисних явищ і стрибків амплітуди при плавній зміні частоти.

Стрибки амплітуди можна спостерігати й на амплітудній характеристиці контуру $U_m(E_{\text{вх}})$ (рис.12), що знята при частоті

$$f_1 < f_{p1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_0 + C_{\text{пар}})}} \quad (2.6)$$

Амплітудна характеристика для частоти $f_2 > f_{p1}$ показана на рис.13.

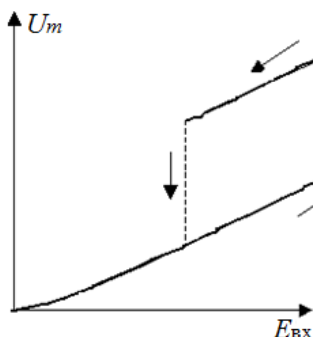


Рисунок 12

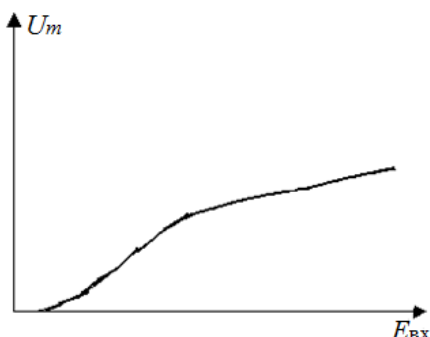


Рисунок 13

2.3 Опис лабораторного пристрою

Лабораторна установка включає:

1. Спеціалізований лабораторний макет.
2. Осцилограф С1-93.
3. Генератор гармонічних коливань ГЗ-112/1.
4. Частотомір ЧЗ-33.
5. Два електронних мілівольтметра ВЗ-38.

Електричну схему лабораторного макета подано на рис. 14. Паралельний досліджуваний коливальний контур містить котушку індуктивності $L1$ (602 мкГн), напівпровідниковий діод $VD1$ типу Д810, що виконує роль варикапа, а також паразитну ємність $C_{\text{пар}}$ (біля 10 пФ). Вольт-фарадна характеристика варикапа зображена на рис. 9 і на лицевій панелі макета.

Напруга зміщення варикапа регулюється ручкою “ $E_{\text{зміщ}}$ ” у межах від 0 до 9 В. Полярність цієї напруги така, що діод знаходиться у зворотному

включенні. Опір резистора $R2$ достатньо великий, щоб не враховувати його шунтуючий вплив на коливальний контур. Напруга зміщення вимірюється вмонтованим у макет вольтметром.

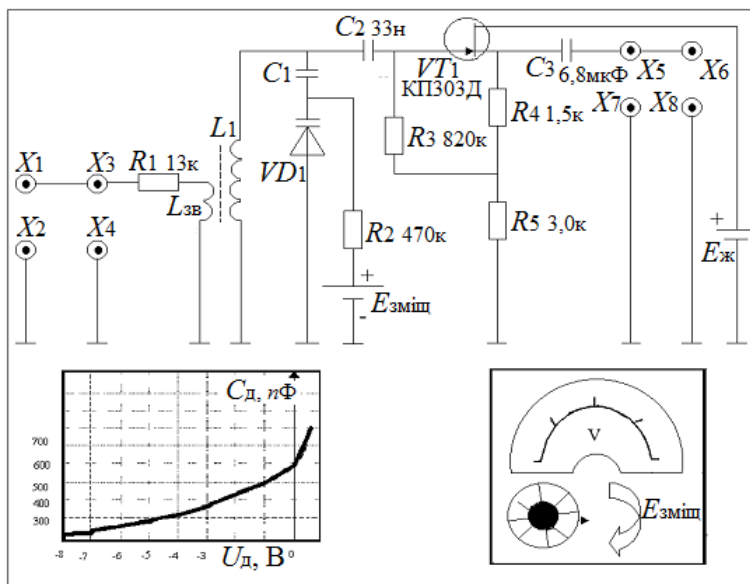


Рисунок 14

Генератор гармонічних коливань зв'язаний із нелінійним досліджуванним коливальним контуром через котушку зв'язку $L_{зв}$ і резистор $R1$. Коефіцієнт зв'язку між $L_{зв}$ і $L1$, а також опір резистора $R1$ вибрані такими, щоб достатньо малий вихідний опір генератора гармонічних коливань не впливав на добротність контуру. Осцилограф і електронний мілівольтметр підключаються до досліджуваного контуру через витоковий повторювач на транзисторі $VT1$ типу КП303Д, що дозволяє виключити вплив на резонансну частоту контуру ємності з'єднувальних кабелів.

Живиться лабораторний макет від автономного джерела постійної напруги. Напруга живлення $E_{ж} = 12$ В стабілізована з використанням мікросхеми K142EN8B.




2.4. Розрахункове завдання

1. Розрахувати значення резонансної частоти контуру f_p при зміщенні $E_{\text{зміщ}} = 2$ В, якщо відомі значення $L1 = 602$ мкГ, $C_{\text{пар}} = 10$ нФ, а також мається на увазі, що амплітуда змінної складової напруги на варикапі достатньо мала і нелінійність його вольт-фарадної характеристики не враховується. Для розрахунку користуватися формулою (2.5) та вольт-фарадною характеристикою варикапа (рис. 9).

2. Розрахувати значення $C_{\text{сер}}$ при $E_{\text{зміщ}} = 2$ В для трьох значень амплітуди змінної складової напруги на варикапі: $U_{m1} = 0,1[E_{\text{зміщ}}]$, $U_{m2} = 0,75[E_{\text{зміщ}}]$ і $U_{m3} = [E_{\text{зміщ}}]$. При розрахунках користуватися методом трьох ординат (рис. 10).

2.5. Порядок виконання експериментальної частини

1. Зняти залежність резонансної частоти контуру від напруги зміщення $f_p(E_{\text{зміщ}})$ при малій амплітуді змінної складової напруги на варикапі U_m . Для цього:

2. Підключити до клем X1-X2 вихід генератора ГЗ-112/1, встановити послаблення “30 дБ”. Тумблер  -  повинен знаходитись у стані “” (гармонічні коливання).

3. Підключити частотомір до виходу генератора ГЗ-112/1, вхід осцилографа до клем X5-X6, електронні мілівольтметри – до клем X3-X4 і X7-X8. Ручка “ $E_{\text{зміщ}}$ ” – в довільному положенні.

4. Встановити регулятор рівня сигналу на генераторі в середнє положення та, змінюючи його частоту, настроїти контур у резонанс за максимальними показниками мілівольтметра. Переконатися, що амплітуда напруги на варикапі U_m не перевищує 0,1 В. (Нагадуємо, що шкала мілівольтметра проградуєвана в діючих значеннях синусоїдальної напруги). Якщо $U_m > 0,1$ В, то треба регулятором рівня сигналу генератора зменшити амплітуду сигналу. Встановити стабільне зображення сигналу на екрані осцилографа. Записати значення $E_{\text{зміщ}}$ і f_p .

5. Провести аналогічно вимірювання для інших значень $E_{\text{зміщ}}$, змінюючи його від 9 до 0 В через кожний 1 В. Результати вимірювань занести до таблиці.

6. Зняти частотні характеристики $U_m(f)$ контуру з нелінійною ємністю при $E_{\text{зміщ}} = 2$ В для трьох значень резонансної амплітуди $U_{\text{мп1}} \approx 0,1$ В, $U_{\text{мп2}} \approx 1,5$ В і $U_{\text{мп3}} \approx 2$ В. Для цього:

7. Встановити напругу зміщення $E_{\text{зміщ}} = 2$ В. Змінюючи частоту сигналу, одержати резонанс у контурі. Рівень сигналу встановити таким, щоб напруга $U_{\text{мп1}} \approx 0,1$ В. Записати значення резонансної частоти $f_{\text{р1}}$ (див. рис. 10).

8. Зняти залежність $U_m(f)$, вимірюючи частоту частотоміром, а напругу U_m мілівольтметром. Кількість точок вимірювань довільна.

9. Провести вимірювання для двох інших значень резонансної напруги. Оскільки частотні характеристики з нелінійною ємністю при амплітуді напруги на варикапі, близької до 2 В, мають гістерезисний характер, рекомендується знімати їх, спочатку знижуючи, а потім підвищуючи частоту сигналу. При цьому необхідно чітко фіксувати частоти f_{01} і f_{02} (рис. 11), що відповідають стрибкоподібним змінам U_m . Усі зняті залежності $U_m(f)$ занести до таблиці.

10. Зняти амплітудні характеристики $U_m(E_{\text{мвх}})$ для частот $f_1 < f_{\text{р1}}$ і $f_2 > f_{\text{р1}}$, де $f_{\text{р1}}$ – резонансна частота, що одержана при виконанні п. 2.5.7. Частоту f_1 доцільно вибирати на 1...3 кГц нижче f_{01} , а частоту f_2 – на 1...5 кГц вище $f_{\text{р1}}$ (див. пп. 2.5.7, 2.5.8, 2.5.9). Рівень вхідного сигналу змінювати в таких межах, щоб характеристики $U_m(E_{\text{мвх}})$ набули вигляду, зазначеного на рис. 11 і 12. Чітко фіксувати значення $E_{\text{мвх}}$, що відповідають стрибкам вихідної напруги (рис. 11), вимірюючи їх мілівольтметром, який підключений до клем ХЗ-Х4. Оскільки амплітудні характеристики на частоті f_1 мають гістерезисний характер, рекомендується знімати їх, спочатку підвищуючи, а потім знижуючи $E_{\text{мвх}}$. Приблизний діапазон значень $E_{\text{мвх}}$ 0...10 В. На екрані осцилографа спостерігати за зміною форми сигналу при збільшенні $E_{\text{мвх}}$. Залежність $U_m(E_{\text{мвх}})$ звести в таблицю. В таблиці відзначити значення $E_{\text{мвх}}$, при якому стає помітним спотворення форми синусоїдальної напруги на контурі. Форму спотвореного сигналу зарисувати.

2.6. Зміст звіту

Звіт повинен містити в собі схему лабораторної установки, перелік вимірювальних приладів, результати розрахунків f_p та $C_{сер}$, таблиці з експериментальними даними, графіки експериментальних залежностей $f_p(E_{зміщ})$, $U_m(f)$, $U_m(E_{mvx})$, зіставлення експериментальних і розрахованих даних.

2.7. Контрольні запитання

1. Поясніть, що являє собою квазілінійний метод аналізу нелінійної системи.
2. Дайте визначення середньої ємності.
3. Як змінюється середня ємність варикапа зі зростанням амплітуди напруги на $p-n$ переході?
4. Чим пояснюється зменшення резонансної частоти контуру при збільшенні амплітуди напруги на варикапі?
5. Наведіть і поясніть частотні характеристики коливального контуру при різних амплітудах вхідного сигналу.
6. Як впливає напруга зміщення на частотні характеристики контуру?
7. Наведіть і поясніть можливий вид амплітудної характеристики контуру з нелінійною ємністю.
8. Поясніть причину спотворення форми синусоїдальної напруги на контурі при її великій амплітуді.

Лабораторна робота 3

ДОСЛІДЖЕННЯ СИНХРОННОГО ДЕТЕКТОРА

3.1. Мета роботи

1. Дослідження основних властивостей синхронного детектора.
2. Експериментальне виявлення впливу режиму роботи синхронного детектора на вихідний ефект детектування.
3. Дослідження процесу фазової селекції сигналів при квадратурній амплітудній модуляції.

3.2. Основні позначення, розрахункові формули та визначення

При детектуванні АМ коливань треба отримати сигнал, пропорційний амплітуді АМ коливання. Цей сигнал не являє собою адитивну складову, тому детектор не може бути лінійною системою з постійними параметрами. Для детектування використовують схеми, які містять в собі нелінійні або лінійні параметричні елементи. Спрощена схема синхронного детектора зображена на рис. 14.

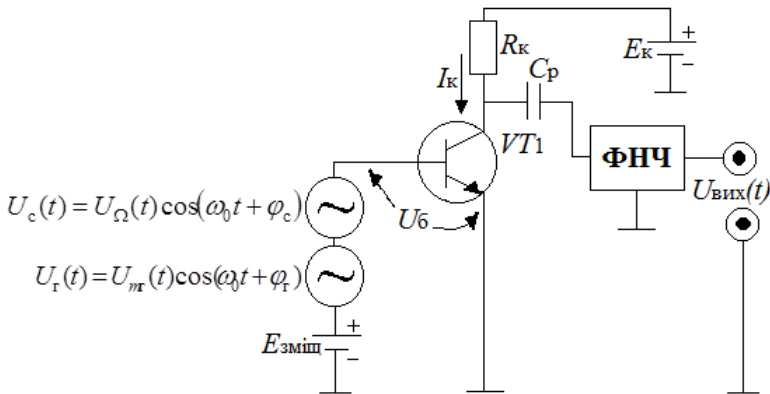


Рисунок 14

На базу транзистора $VT1$, який має нелінійну характеристику $I_K = f(U_6)$, подаються два сигнали: АМ сигнал, що детектується,

$$U_{\Omega}(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_c) \quad (3.1)$$

і не модульований сигнал гетеродина

$$U_{m\Gamma}(t)\cos(\omega_0 t + \varphi_{\Gamma}) , \quad (3.2)$$

тому напруга на базі транзистора

$$U_{\bar{6}} = E_{\text{зміщ}} + U_{m\Gamma} \cos(\omega_0 t + \varphi_{\Gamma}) + U_{\Omega} \cos(\omega_0 t + \varphi_c) . \quad (3.3)$$

Призначення детектора – виділити низькочастотний модульований сигнал $U_{\Omega}(t)$ з цієї суми. Як правило, амплітуда $U_{m\Gamma}(t)$ значно перевищує найбільше значення $U_{\Omega}(t)$.

Сигнал гетеродина призводить до того, що крутість характеристики $I_k = f(U_{\bar{6}})$ стає функцією часу, яку можна розкласти в ряд Фур'є:

$$S(t) = S_0 + S_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_{\Gamma}) + S_2 \cos(\omega_0 t + 2\varphi_{\Gamma}) + S_3 \cos(3\omega_0 t + 3\varphi_{\Gamma}) + \dots, \quad (3.4)$$

де S_0, S_1, S_2 – постійні коефіцієнти ряду, а змінна складова струму колектора $\Delta I_k(t)$, що викликається впливом АМ сигналу $U_c(t)$:

$$\begin{aligned} \Delta I_k(t) &= S(t) \cdot U_c(t) = S_0 U_{\Omega}(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_c) + \\ &+ \frac{1}{2} S_1 U_{\Omega}(t) \cos(\varphi_{\Gamma} - \varphi_c) + \frac{1}{2} S_1 U_{\Omega}(t) \cos(2\omega_0 t + \varphi_{\Gamma} + \varphi_c) + \\ &+ \frac{1}{2} S_2 U_{\Omega}(t) \cos(\omega_0 t + 2\varphi_{\Gamma} - \varphi_c) + \\ &+ \frac{1}{2} S_2 U_{\Omega}(t) \cos(3\omega_0 t + 2\varphi_{\Gamma} + \varphi_c) + \dots \end{aligned} \quad (3.5)$$

Напруга $U_{\text{вих}}(t)$ визначається тільки низькочастотною складовою струму $\Delta I_k(t)$, тому що фільтр низьких частот (ФНЧ) всі інші складові суми (3.5) не пропустить. Таким чином,

$$U_{\text{вих}}(t) = \frac{1}{2} S_1 R_k K_{\text{ФНЧ}} U_{\Omega}(t) \cos(\varphi_{\Gamma} - \varphi_c) , \quad (3.6)$$

де $K_{\text{ФНЧ}}$ – коефіцієнт передачі напруги фільтра у смузі пропускання.

Таким чином, $U_{\text{вих}}(t)$ пропорційна напрузі модулюючого сигналу $U_{\Omega}(t)$. Якщо $\varphi_{\Gamma} = \varphi_c$, то $U_{\text{вих}}(t)$ буде максимальна, а при $\varphi_{\Gamma} - \varphi_c = \frac{2}{\pi}$ – дорівнює нулю.

Ця обставина дозволяє здійснити так звану фазову селекцію двох АМ сигналів. Дійсно, якщо

$$U_c(t) = U_{\Omega 1}(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_c) + U_{\Omega 2}(t) \sin(\omega_0 t + \varphi_c) , \quad (3.7)$$

то при $\varphi_T = \varphi_c$ на виході детектора буде присутня напруга $U_{\Omega 1}(t)$, а при $\varphi_T - \varphi_c = \frac{2}{\pi} - U_{\Omega 2}(t)$. Крім того, синхронний детектор можна використовувати для детектування сигналів з односмуговою АМ (SSB), для сигналів з фазовою модуляцією (ФМ).

У лабораторній роботі разом із синхронним детектуванням досліджується так зване пряме детектування, коли на базу транзистора VT1 подається лише АМ коливання і напруга зміщення $E_{\text{зміщ}}$:

$$U_6 = E_{\text{зміщ}} + U_{\Omega}(t) \cos(\omega_0 t + \varphi) . \quad (3.8)$$

У зв'язку з нелінійністю характеристики $I_k = f(U_6)$ вихідний струм може бути зображений у вигляді ряду Фур'є:

$$I_k = I_0 + I_1 \cos(\omega_0 t + \varphi) + I_2 \cos(\omega_0 t + 2\varphi) + \dots \quad (3.9)$$

Амплітуди I_0, I_1, I_2, \dots є функціями $E_{\text{зміщ}}$ і $U_{\Omega}(t)$. Всі складові виразу (3.9), окрім нульової, – модульовані коливання високої частоти. Нульова складова I_0 змінюється спільно зі значенням $U_{\Omega}(t)$, тобто може відтворити закон модуляції. Ця складова вихідного сигналу детектора виділяється за допомогою ФНЧ.

При полігональній апроксимації характеристики $I_k = f(U_6)$ залежність I_0 від $U_{\Omega}(t)$ має вигляд:

$$I_0 = \frac{SU_{\Omega}(t)}{\pi} (\sin \theta - \theta \cos \theta) , \quad (3.10)$$

де кут відсічення:

$$\theta = \arccos \frac{U_{\text{поч}} - E_{\text{зміщ}}}{U_{\Omega}} . \quad (3.11)$$

У виразі (3.11) $U_{\text{почат}}$ – напруга відкривання транзистора VT1.

Для того щоб залежність I_0 від $U_{\Omega}(t)$ була лінійною, треба, щоб кут відсічки θ не залежав від U_{Ω} . Це буде при $E_{\text{зміщ}} = E_{\text{поч}}$, тобто при $\theta = 90^\circ$. При цьому

$$I_c(t) = \frac{SU_{\Omega}(t)}{\pi} . \quad (3.12)$$

При $E_{\text{зміщ}} \neq E_{\text{поч}}$ амплітуда сигналу на виході детектора зменшується, а його форма спотворюється.

3.3. Опис лабораторного пристрою

Лабораторна установка включає до себе:

1. Спеціалізований лабораторний макет, принципова схема якого наведена на рис. 15.
2. Двоканальний осцилограф С1-93.
3. Генератор гармонічного сигналу ГЗ-112/1.
4. Фазометр Ф2-1.

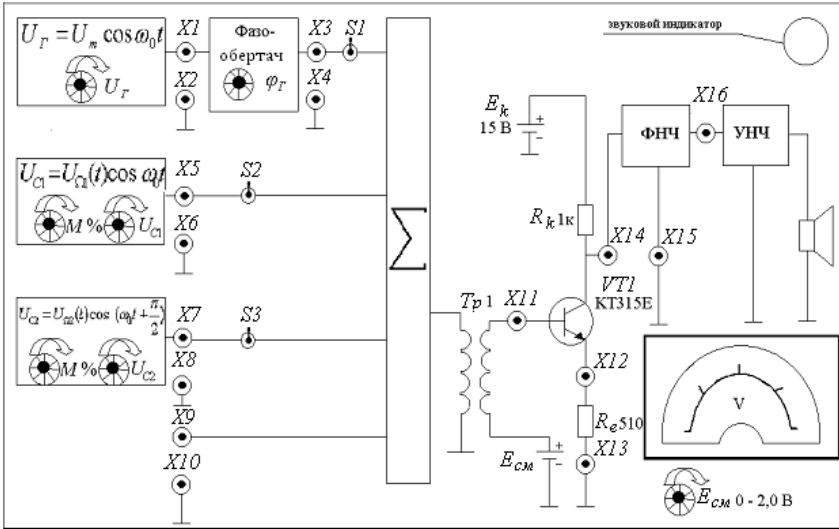


Рисунок 15

Макет включає генератор – гетеродин гармонічного коливання $U_r(t)$ з частотою $f_r = 77$ кГц, з амплітудою, що регулюється ручкою “ U_r ”, та фазою, що регулюється в межах 180° ручкою “ φ_r ”. Крім того, до складу лабораторного макета входять генератори синфазного по відношенню до $U_r(t)$ сигналу $U_{C1}(t)$ з амплітудною модуляцією (частота модуляції – 600 Гц) і квадратурного сигналу $U_{C2}(t)$ з частотою модуляції 1500 Гц. Існує можливість регулювання глибини модуляції та амплітуди несучого коливання двох сигналів.

Напряга $U_r(t)$ і амплітудно-модульовані сигнали $U_{C1}(t)$ і $U_{C2}(t)$ підсумовуються в лінійному суматорі та надходить на нелінійний елемент у

вигляді транзистора VT1. Напруга зміщення в колі бази транзистора плавно регулюється в межах 0...2 В та вимірюється вмонтованим у передню панель макета вольтметром. За допомогою фільтра нижніх частот (ФНЧ) із смугою пропускання біля 5 кГц виділяється низькочастотне коливання як продукт детектування, яке підсилюється та надходить на звуковий індикатор.

3.4. Розрахункове завдання

Перед виконанням експериментальної частини роботи необхідно виконати попередній розрахунок, що зводиться до нижчезазначеного:

1. Виконати полігональну апроксимацію характеристики транзистора $I_K(U_6)$ (рис. 16) і визначити $U_{\text{поч}}$ – напругу відсічення струму колектора. Визначити середню крутизну цієї характеристики.

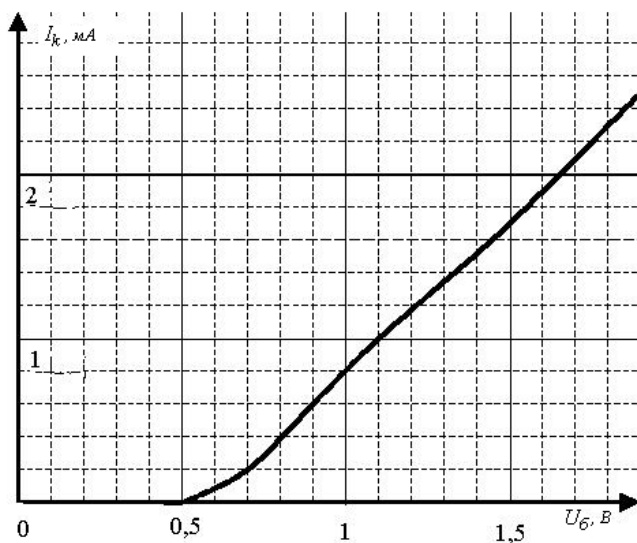


Рисунок 16

$$S = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_6} . \quad (3.13)$$

2. Задати у відповідності до табл.3.1 такі параметри:

$E_{\text{зміщ}}$ – напруга джерела зміщення,

U_m – амплітуда напруги гетеродина,

U_{mC} – амплітуда несучого коливання АМ-сигналу,

M – коефіцієнт глибини модуляції,

φ_r – фазовий зсув між напругою гетеродина та несучою коливання АМ-сигналу.

Таблиця 3.1

Параметр № бригади	$E_{зміщ}$, В	U_m , В	U_{mC} , В	M , %	φ_r , град.
1	0,05	1,5	0,3	45	0
2	0,1	1,3	0,25	40	0
3	0,05	2,0	0,35	35	0
4	0,1	1,25	0,3	40	0

3. Розрахувати кут відсічення θ для заданих $E_{зміщ}$, U_m і значення $U_{поч}$, що було знайдене в п. 3.4.1

$$\theta = \arccos \frac{U_{поч} - E_{зміщ}}{U_m}. \quad (3.14)$$

4 Визначити 1-шу гармоніку крутості транзистора при дії на нього напруги гетеродина

$$S_1 = \frac{2S}{\pi} \cdot \sin \theta. \quad (3.15)$$

5. Визначити амплітуду низькочастотного коливання, що модулює несуче коливання

$$U_{m\Omega} = U_{mC} \cdot M. \quad (3.16)$$

6. Розрахувати амплітуду низькочастотного коливання на виході ФНЧ (кінцевий продукт детектування)

$$U_{mвих} = 0,5 \cdot K_{ФНЧ} \cdot R_k \cdot S_1 \cdot U_{m\Omega} \cdot \cos \varphi_r, \quad (3.17)$$

де $K_{ФНЧ} \approx 0,4$ – коефіцієнт передачі напруги фільтра нижніх частот (ФНЧ) у смузі пропускання, $R_k = 1$ кОм.

3.5. Порядок виконання експериментальної частини


1 Дослідити ефект прямого детектування АМ-сигналу. Для цього:


○ Підключити тумблером S_2 до суматора АМ-сигналу $U_{C1}(t)$. При цьому напруга гетеродина і сигнал $U_{C2}(t)$ повинні бути відімкнуті від нього.

○ Підключити вхід Y -каналу 2 до бази транзистора $VT1$ (клеми $X11$ – $X13$).

○ Виконати початкові установки на осцилографі. Для цього:

○ натиснути кнопку перемикача режиму роботи “2”;

○ встановити внутрішню синхронізацію, натискуючи кнопку “Внутр.2” і “”;

○ натиснути кнопку “”;

○ встановити режим автоматичної розгортки кнопкою “Авт-ждуш”;

○ встановити перемикачем “V/дел” 2-го каналу коефіцієнт відхилення $K_Y = 0,2$ В/дел;

○ встановити перемикачем “время/дел” коефіцієнт відхилення по горизонталі $K_X = 1$ ms/діл ;

○ встановити важільок перемикача режиму роботи входу 2-го каналу осцилографа в положення “ \perp ”, ручкою переміщення променя вдовж вертикалі сумістити лінію розгортки з центральною віссю координатної сітки і повернути важільок у положення “ \sim ” (закритий вхід);

○ встановити при відсутності модуляції (ручка “ M %” для сигналу $U_{C1}(t)$ обернута проти годинникової стрілки до упору) ручкою “ U_{C1} ” амплітуду U_{mC} несучого коливання відповідно до табл. 1.7. Вимірювання проводити осцилографом на базі транзистора $VT1$;

○ встановити ручкою “ M %” коефіцієнт глибини модуляції відповідно до табл.7. Вимірювання коефіцієнта M проводити за осцилограмою (див. рис.17).

Слідкувати за тим, щоб при повороті ручки “ M %” обвідна АМ-сигналу мала несповторений синусоїдальний характер (однотональна модуляція).

Якщо ручкою “Рівень” на осцилографі важко синхронізувати зображення АМ сигналу вдовж обвідної, то необхідно плавно підстроїти частоту розгортки ручкою “Розгортка плавно”.

Зарисувати осцилограми напруги U_e на емітері транзистора (клеми $X12$ - $X13$) при напрузі зміщення $E_{зміщ}$ 0,05 , 0,5 і 1,0 В.

$$M = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{X_{\max} + X_{\min}} \cdot 100 \% . \quad (3.18)$$

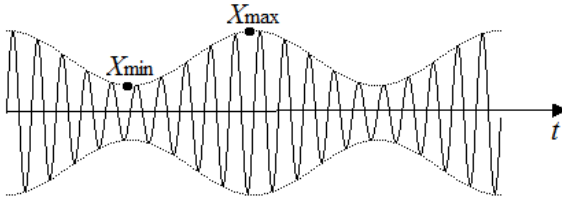


Рисунок 17

2. Дослідити залежність амплітуди НЧ напруги на виході ФНЧ (клеми Х15–Х16) від напруги $E_{\text{зміщ}}$, змінюючи останнє в межах 0...1 В через кожні 0,2 В. Результати вимірювань подати у вигляді таблиці. В цьому експерименті вимірювати амплітуду вихідного НЧ коливання за допомогою осцилографа бажано при коефіцієнті відхилення $K_X = 0,01$ В/діл.

Одержати ефект синхронного детектування і дослідити його. Для цього:

- Прибрати ефект прямого детектування, зменшуючи напругу зміщення до значення, що вказано в табл.7 (?). В подальшому напругу зміщення не змінювати.

- Підключити вхід фазометра Ф2-1 “Опорн” до клем Х1–Х2, а вхід “Сигнал” – до Х3–Х4. Провести установку нуля приладу та його калібрування. Тумблер “опережает – отстает” установити в положення “опережает”. Перемикач вибору масштабу вимірювання встановити в положення “100”.

- Встановити ручкою “ φ_r ” фазообертача нульовий фазовий зсув між напругою гетеродина “ U_r ” і АМ-сигналом U_{C1} .

- Підключити напругу гетеродина до суматора тумблером S1. Встановити ручкою “ U_r ” амплітуду напруги гетеродина в відповідності до табл.

3.1. Вимірювання проводити осцилографом на базі транзистора (клема Х11), тимчасово відключивши тумблером S2 напругу U_{C1} . Після закінчення вимірювання знов підключити АМ-сигнал до суматора.

- Зарисувати осцилограми напруги на емітері транзистора (клеми X12–X13) і на його колекторі (клеми X14–X13). Коефіцієнт відхилення в цьому випадку $K_Y = 0,5$ В/діл.

- Підключити вхід осцилографа до клем X16–X15, встановити $K_Y = 0,01$ В/діл і виміряти амплітуду напруги $U_{m\text{вих}}$ на виході ФНЧ. Порівняти цю напругу з результатом, що одержаний шляхом розрахунку.

- Зняти залежність $U_{m\text{вих}}(\varphi_T)$, змінюючи фазу φ_T ручкою “ φ_T ” та вимірюючи $U_{m\text{вих}}$ за допомогою осцилографа. Результат вимірювань звести в таблицю.

3. Дослідити ефект фазової селекції квадратурних АМ-сигналів. Для цього:

- * Підключити вхід осцилографа до клем X7–X8 та, використовуючи методику, що описана в пп.1.4 і 1.5, встановити параметри квадратурного сигналу $U_{C2}(t)$, такі ж, як і в синфазного сигналу $U_{C1}(t)$.

- * Підключити квадратурний сигнал до синхронного детектора тумблером S3.

- * Підключити вхід осцилографа до виходу ФНЧ (клеми X16–X15) і встановити коефіцієнт відхилення $K_Y = 0,01$ В/діл.

- * Провести роздільне детектування сигналів $U_{C1}(t)$ і $U_{C2}(t)$ шляхом зміни фазового зсуву φ_T . Результат фазової селекції контролювати за допомогою зображення на екрані осцилографа і шляхом прослуховування тональності виділеного сигналу. Записати, при яких значеннях фазового зсуву φ_T існує відокремлене детектування синфазного і квадратурного сигналів.

4. Дослідити вплив неузгодження гетеродина й джерела АМ сигналу за частотою. Для цього:

- Підключити до суматора синхронного детектора один з АМ-сигналів, а в ролі гетеродина використати гармонічне коливання генератора ГЗ-112/1, що подане на клеми X9–X10. Перед тим за допомогою осцилографа встановити амплітуду цього сигналу $U_{m\text{зовніш}} \approx 1,5$ В.

- Подивитися й зарисувати осцилограми напруги на виході ФНЧ (клеми X16–X15) при незначному неузгодженні за частотою зовнішнього генератора та АМ-сигналу ($|f_{\text{зовніш}} - f_0| \approx 1 \dots 10$ Гц).

3.6. Зміст звіту

Звіт повинен вміщувати схему лабораторної установки, перелік вимірювальних приладів, результати виконання попереднього розрахунку, таблиці з експериментальними даними, осцилограми напруги, що одержані при виконанні експериментів. До кожного рисунку необхідно додати відповідний запис. Навести порівняння і аналіз даних розрахунку й експериментів.

Контрольні запитання

1. Наведіть принципову схему синхронного детектора і поясніть призначення елементів.
2. В чому полягає принцип синхронного детектування?
3. В чому полягає принцип прямого детектування АМ-сигналів?
4. Перерахуйте і поясніть основні властивості синхронного детектора.
5. В чому полягає перевага синхронного детектора перед прямим АМ-детектором?
6. Поясніть принцип фазової селекції квадратурних АМ-сигналів.
7. Поясніть вплив на роботу прямого й синхронного АМ-детекторів зміни напруги зміщення на базі транзистора.
8. Як впливає на вихідну напругу синхронного детектора неузгодження за частотою напруги гетеродина й АМ-сигналу?
9. Які елементи треба використати у схемі синхронного детектора замість транзистора?
10. Поясніть, в яких випадках нелінійний елемент можна використати як лінійний параметричний.
11. Для детектування яких видів модуляції, крім АМ, можна використати синхронний детектор?

Лабораторна робота 4

ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРА ГАРМОНІЧНИХ КОЛИВАТЬ ПРИ ЇХ НЕЛІНІЙНОМУ ПЕРЕТВОРЕННІ

4.1. Мета роботи

1. Експериментальне визначення і розрахунок на комп'ютері спектральних складових відгуку нелінійного кола на гармонічний вплив.

2. Засвоєння основних методів підрахунку спектра гармонічних коливань при їх нелінійному перетворенні.

4.2. Основні позначення, розрахункові формули та визначення

Якщо в нелінійному колі з відомою вольт-амперною характеристикою (ВАХ) $I = f(u)$ напруга $u(t) = U_0 + U_m \cos \omega_0 t$, де U_0 – постійна складова, а U_m – амплітуда гармонічного коливання з частотою ω_0 , то форма струму $I(t)$ буде суттєво відрізнятися від форми напруги $u(t)$ (рис. 18) і його можна подати рядом Фур'є:

$$I(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\omega_0 t - \varphi_n). \quad (4.1)$$

У формулі 4.1 I_0 – постійна складова струму; n – порядковий номер його гармонічної складової; I_n і φ_n – амплітуда і початкова фаза n -ої гармоніки.

Якщо ВАХ нелінійного кола апроксимується ступеневим рядом Тейлора

$$I = a_0 + a_1(u - u_0) + a_2(u - u_0)^2 + a_3(u - u_0)^3 + \dots = a_0 + \sum_{k=1}^N a_k (u - u_0)^k, \quad (4.2)$$

де $a_0, a_1, a_2, a_3, \dots = a_N$ – його коефіцієнти, то постійну складову і амплітуди гармонік струму можна знайти як

$$I_0 = a_0 + \frac{1}{2} a_2 U_m^2 + \frac{3}{8} a_4 U_m^4 + \frac{5}{16} a_6 U_m^6, \quad (4.3)$$

$$I_1 = a_1 U_m + \frac{3}{4} a_3 U_m^3 + \frac{5}{18} a_5 U_m^5, \quad (4.4)$$

$$I_2 = \frac{1}{2} a_2 U_m^2 + \frac{1}{2} a_4 U_m^4 + \frac{15}{32} a_6 U_m^6, \quad (4.5)$$

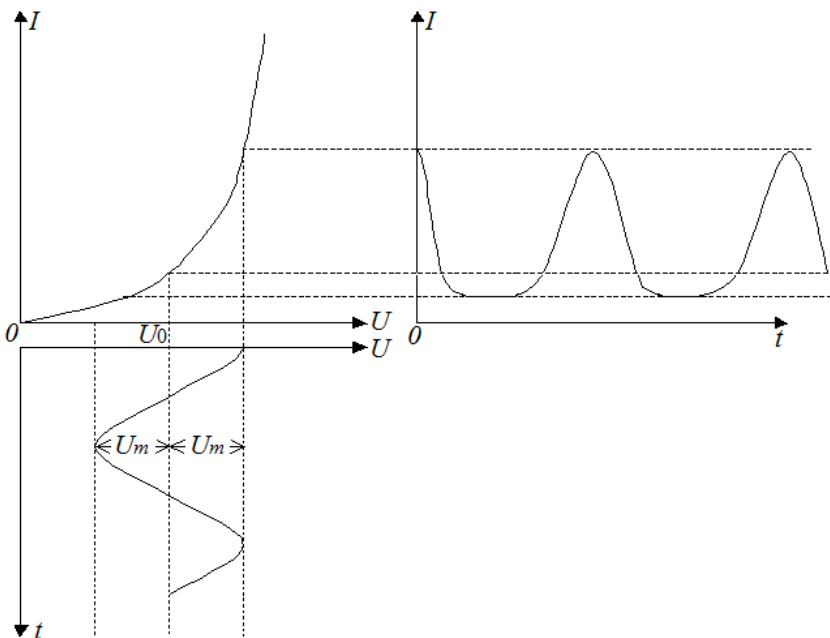


Рисунок 18

$$I_3 = \frac{1}{4} a_3 U_m^3 + \frac{5}{16} a_5 U_m^5, \quad (4.6)$$

$$I_4 = \frac{1}{8} a_4 U_m^4 + \frac{3}{16} a_6 U_m^6, \quad (4.7)$$

$$I_5 = \frac{1}{16} a_5 U_m^5, \quad (4.8)$$

$$I_6 = \frac{1}{32} a_6 U_m^6. \quad (4.9)$$

Якщо ВАХ нелінійного кола можна надати у вигляді відрізків прямих (рис 18), то для знаходження спектра струму використовують так звані коефіцієнти Берга $a_0(\theta), a_1(\theta), a_2(\theta), a_3(\theta) \dots a_n(\theta)$, надані в додатку.

Математичний вираз ВАХ, наведеної на рис 18,

$$I = \begin{cases} S(u - u_H), & u \geq u_H \\ 0, & u < u_H \end{cases}, \quad (4.10)$$

де $s = \frac{dI}{dU}$ – крутість характеристики.

Висота імпульсів струму нелінійного елемента

$$I_m = S(U_0 + U_m - U_H), \quad (4.11)$$

а так званий кут відсічення

$$\theta = \arccos \frac{U_H - U_0}{U_m}. \quad (4.12)$$

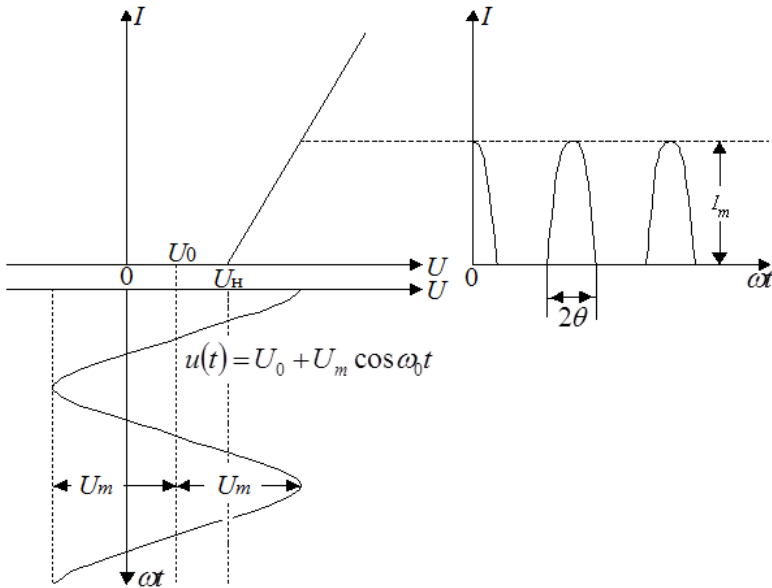


Рисунок 19

Постійна складова струму

$$I_0 = I_m \alpha_0(\theta), \quad (4.13)$$

а амплітуди його гармонічних складових

$$I_n = I_m \alpha_n(\theta), \quad (4.14)$$

де $\alpha_0(\theta)$ і $\alpha_n(\theta)$ – значення коефіцієнтів Берга нульового і n -го порядку при куті відсічки θ , знайденому з формули (4.2).

При наданій ВАХ нелінійного елемента постійну складову струму I_0 і амплітуди перших чотирьох гармонік можна знайти так званим методом

п'яти ординат. Для цього необхідно на осі абсцис намітити п'ять значень напруги і знайти відповідні їм значення струму (див. рис. 20).

Тоді складові спектру струму наступні:

$$I_0 = \frac{1}{6} \{ [I(4) + I(1)] + [I(3) + I(2)] \} , \quad (4.15)$$

$$I_1 = \frac{1}{3} \{ [I(4) - I(1)] + [I(3) - I(2)] \} , \quad (4.16)$$

$$I_2 = \frac{1}{4} \{ [I(4) + I(1)] - 2I(0) \} , \quad (4.17)$$

$$I_3 = \frac{1}{6} \{ [I(4) - I(1)] - 2[I(3) - I(2)] \} , \quad (4.18)$$

$$I_4 = \frac{1}{12} \{ [I(4) + I(1)] - 4[I(3) + I(2)] + 6I(0) \} . \quad (4.19)$$

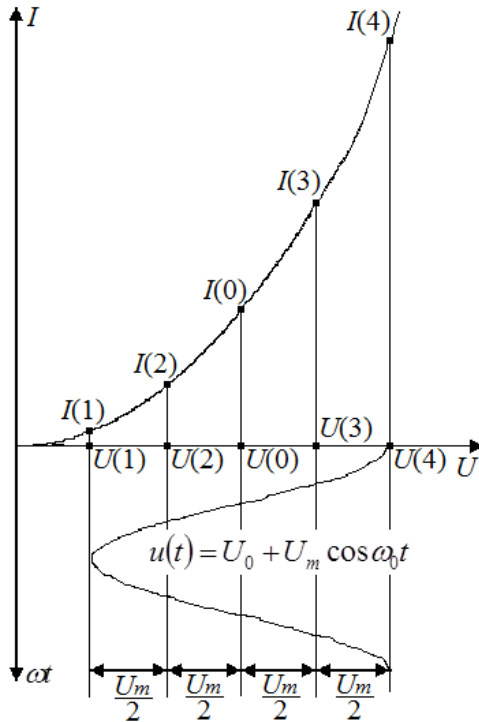


Рисунок 20

4.3. Опис лабораторного пристрою

Лабораторна установка включає:

1. Спеціалізований лабораторний макет, структурна схема якого наведена на рис. 21.
2. Генератор гармонічного сигналу ГЗ-112/1.
3. Осцилограф С1-93.
4. Два електронних мілівольтметра ВЗ-38.
5. Цифровий частотомір ЧЗ-33.

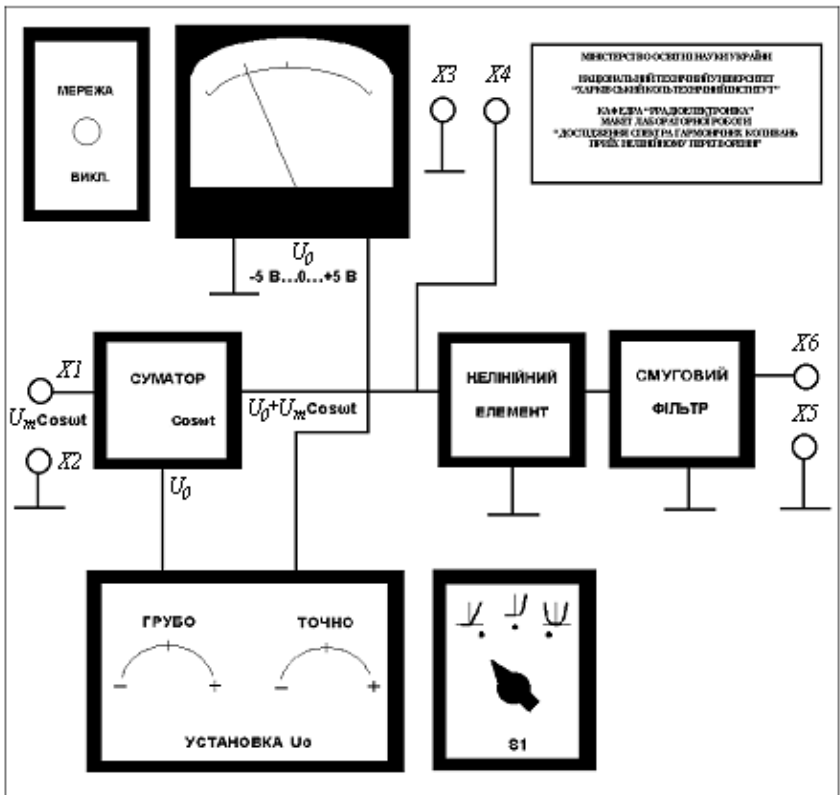
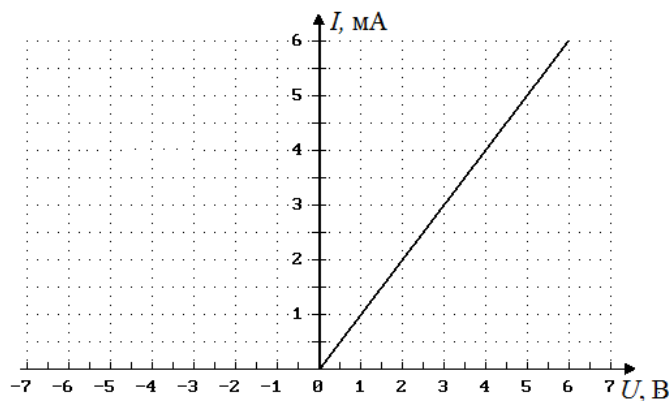


Рисунок 21

Основним елементом макета є один з трьох типів нелінійних елементів, тобто:

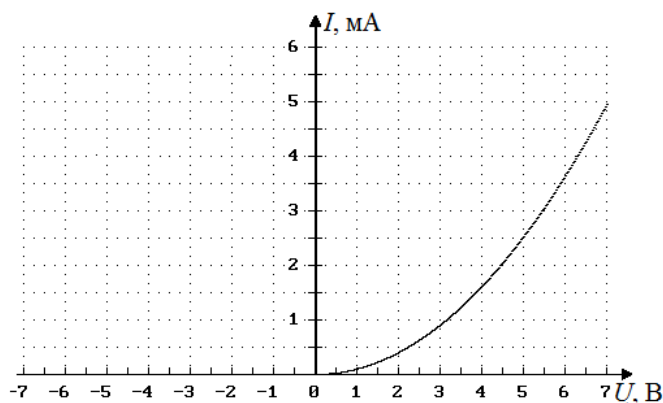
- * однобічний лінійний вентиль;
- * однобічний квадратор;
- * оовічний квадратор.

ВАХ цих елементів наводиться на рис. 22, 23, 24, а вибір необхідної нелінійності проводиться перемикачем $S1$.



Рівняння ВАХ однобічного лінійного вентиля $I = \begin{cases} aU, & U \geq 0 \\ 0, & U < 0, \end{cases}$ де $a=1$

Рисунок 22



Рівняння ВАХ однобічного квадратора $I = \begin{cases} aU^2, & U \geq 0 \\ 0, & U < 0, \end{cases}$ де $a=0,1$

Рисунок 23

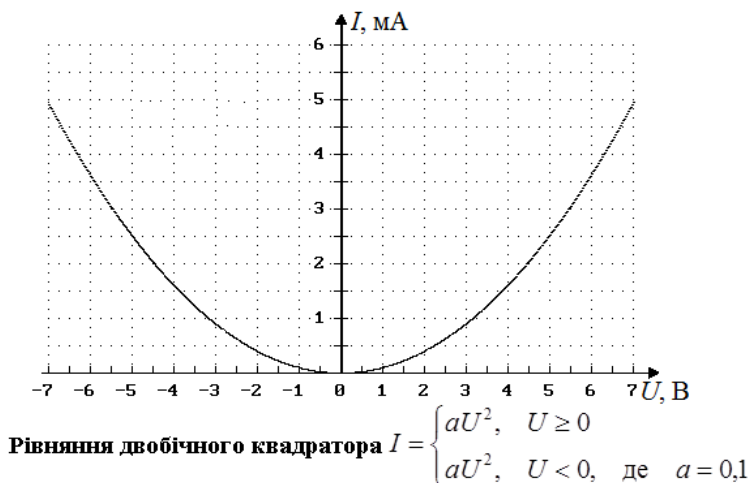


Рисунок 24

Напруга $u(t) = U_0 + U_m \cos \omega_0 t$, що подається на вибраний нелінійний елемент, формується на суматорі, на один вхід якого з зовнішнього генератора ГЗ-112/2 подається гармонічне коливання, дієве значення якого вимірюється електронним мілівольтметром, підключеним до клем ХЗ–Х4, частота контролюється частотоміром ЧЗ-33. На другий вхід суматора надходить постійна напруга U_0 , яку можна регулювати грубо та точно ручками “Установка U_0 ” і вимірювати внутрішнім вольтметром у межах від -5 В до $+5$ В.

Гармонічні складові спектра відгуку нелінійного елемента виділяються електричним смуговим фільтром з центральною частотою пропускання $f_0 = 215$ кГц, а їх дієве значення напруги для n -ї гармоніки $U_n = I_n R_n$ де $R_n = 1$ кОм вимірюється мілівольтметром ВЗ-38, підключеним до клем Х5–Х6. До цих же клем підключається осцилограф С1-93, за допомогою якого контролюється форма гармонічної складової, що виділяється фільтром. Амплітуда гармонік напруги на виході смугового фільтра пропорційна амплітуді гармонічних складових струму нелінійного елемента. Для виділення першої гармоніки відгуку нелінійного елемента гармонічний сигнал на клеммах Х1–Х2 повинен мати частоту $f_{\text{вх}} = f_0 = 215$ кГц, а для виділення n -ої гармоніки частота цього сигналу повинна бути в n разів меншою:

$$f_{\text{вх}} = \frac{f_0}{n} = \frac{215}{n} \text{ кГц.} \quad (4.20)$$

Рекомендовані параметри вхідної напруги $U_0 + U_m \cos \alpha \omega t$ надані в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

№ варіанта	Тип нелінійності	U_0 , В	U_m , В
1	Однобічний лінійний вентиль	-2	4
2	Однобічний лінійний вентиль	0	6
3	Однобічний лінійний вентиль	2	4
4	Однобічний лінійний вентиль	-3	4
5	Однобічний лінійний вентиль	-1	5
6	Однобічний квадратор	-2	4
7	Однобічний квадратор	0	6
8	Однобічний квадратор	2	4
9	Однобічний квадратор	3	3
10	Однобічний квадратор	4	3
11	Двобічний квадратор	0	6
12	Двобічний квадратор	2	4
13	Двобічний квадратор	-1	4
14	Двобічний квадратор	-2	4
15	Двобічний квадратор	-3	4

4.4. Порядок виконання комп'ютерної та експериментальної частин

Лабораторна робота виконується у два етапи. На першому етапі за допомогою спеціальної комп'ютерної програми визначаються перші чотири гармоніки струму на виході нелінійного елемента відповідно до варіанта табл. 4.1, заданого викладачем. У другій частині роботи спектральний склад визначається експериментально на лабораторному макеті і порівнюється з розрахунковим.

4.5. Комп'ютерний розрахунок для однобічного вентиля

Для комп'ютерного розрахунку використовується програма "Ibteylor", розроблена на кафедрі "Радіоелектроніка".

1. Згідно з наданим варіантом ввести до комп'ютера значення вхідної напруги U_m , U_0 .

2. Записати в лабораторний журнал з екрана монітора значення кута відсікання θ , а також абсолютні та відносні значення коефіцієнтів Берга та відносні значення напруги на виході фільтра. Записи краще надати у вигляді табл. 4.2, де n – номер гармоніки, $\alpha_n(\theta)$ – коефіцієнт Берга для n -ї гармоніки при визначеному куті відсікання θ , U_n – напруга n -ї гармоніки.

Таблиця 4.2

n	$\alpha_n(\theta)$	$\frac{a_n(\theta)}{a_1(\theta)}$	$\frac{U_n}{U_1}$
1			
2			
3			
4			

4.6. Комп'ютерний розрахунок для квадратичних нелінійних елементів

Визначити із запропонованого викладачем варіанта (табл. 4.3) координати струму $I(0)..I(4)$ і напруги $U(0)..U(4)$ відповідно до рис. 20. Занести ці дані у табл. 4.3 і ввести їх у комп'ютер.

Записати розраховані комп'ютером значення коефіцієнтів ряду Тейлора $a_0..a_4$ і навести в лабораторному журналі цей ряд згідно з (4.6.1).

Таблиця 4.3

Електр. параметр	0	1	2	3	4
$U(i)$					
$I(i)$					

Записати розраховані комп'ютером абсолютні значення амплітуд гармонік струму в нелінійному елементі та відносні значення амплітуд гармонік напруги на виході смугового фільтра (табл. 4.4).

Таблиця 4.4

Гармоніч. складова	1	2	3	4
I_n				
$\frac{U_n}{U_1}$				

4.7 Експериментальна частина лабораторної роботи

* Підключити до клем Х1–Х2 генератор гармонічних сигналів ГЗ-112/1 і цифровий частотомір ЧЗ-33.

* Підключити до клем Х3–Х4 мілівольтметр ВЗ-38, який вимірює дієве значення змінної напруги на нелінійному елементі.

* Підключити до клем Х5–Х6 осцилограф С1-93 і мілівольтметр ВЗ-38, за допомогою яких контролюється форма і вимірюється дієве значення напруги гармонічних складових відгуку нелінійного елемента.

* Перемикачем S1 вибрати нелінійний елемент “Однобічний лінійний вентиль”.

* Встановити ручками “Установка U_0 ” “Грубо” і “Точно” постійну складову напруги на нелінійному елементі U_0 відповідно до номера варіанта завдання.

* Встановити частоту сигналу генератора $f_{\text{вх}} = f_0 = 215 \text{ кГц}$ і амплітуду U_m згідно з варіантом завдання. Виміряти дієве значення напруги першої гармоніки відгуку нелінійного елемента на виході фільтра, пам’ятаючи, що U_m в $\sqrt{2}$ разів більше дієвого значення напруги. Результат занести в табл. 4.5 Форму гармоніки контролювати осцилографом.

Таблиця 4.5

Напруга гармоніки	1	2	3	4
U_0				
$\frac{U_n}{U_1}$				

* Повторити завдання п. 3.6 для частот сигналу генератора $f_2 = \frac{215}{2}$ кГц, $f_2 = \frac{215}{3}$ кГц, і $f_4 = \frac{215}{4}$ кГц, вимірюючи діючі значення напруги відповідно до другої, третьої та четвертої гармоніки.

* Повторити п. 4.7 для іншого заданого нелінійного елемента.

4.8. Розрахункове завдання

Розрахунок виконується при оформленні звіту до лабораторної роботи.

1. Виконати розрахунок при однобічному лінійному вентилі.

2. Розрахувати за формулою (4.12) кут відсічення.

3. Визначити з графіка на рис. 22 значення крутості S і розрахувати за формулою (4.11) висоту імпульсів струму I_m .

4. Знайти з таблиці додатку значення коефіцієнтів Берга $\alpha_1(\theta) \dots \alpha_4(\theta)$ і за формулами (4.4) обчислити амплітуди гармонік струму $I_1 \dots I_4$. Звести отримані дані в таблицю і порівняти нормовані значення гармонік з тими, що були одержані під час експерименту.

5. Виконати розрахунок при квадратичних ВАХ нелінійних елементів.

Розрахунок рекомендується виконувати методом п'яти ординат. Для цього необхідно скористатись даними з табл. 4.3 і формулами (4.15) – (4.19).

6. Звести одержані дані в табл. 4.6. і порівняти нормовані значення гармонік з тими, що були отримані при комп'ютерному розрахунку і при виконанні експерименту.

Таблиця 4.6

	Гармонічна складова	1	2	3	4
Лінійний вентиль	I_n				
	$\frac{I_n}{I_1}$				
Квадратор	I_n				
	$\frac{I_n}{I_1}$				

4.9. Зміст звіту

Звіт повинен вміщувати схему лабораторної установки, перелік вимірювальних приладів, таблиці з розрахунковими і експериментальними даними. Для кожної таблиці повинен бути відповідний запис і аналіз порівняння даних розрахунку і експерименту.

4.10. Контрольні запитання

1. Поясніть принцип вимірювання гармонік у даній роботі.
2. Як залежить постійна складова струму нелінійного елемента від відсутності чи наявності змінної складової напруги на ньому?
3. Який метод визначення спектра відгуку нелінійного елемента треба використовувати при полігональній апроксимації його ВАХ? В чому суть методу?
4. ВАХ нелінійного елемента $I = a_2(u - u_0)^2$, а напруга на ньому $u(t) = U_0 + U_m \cos \alpha \omega t$. Знайдіть вираз для постійної складової струму і його гармонік.
5. При якому куті відсічення буде мати максимальне значення перша (друга, третя, ...) гармоніка відгуку нелінійного елемента на гармонічний вплив?
6. Назвіть розмірність коефіцієнтів ряду Тейлора для ВАХ нелінійного елемента.
7. Які члени ряду Тейлора впливають на другу (четверту) гармоніки відгуку нелінійного елемента на гармонічний вплив?
8. Напруга на нелінійному елементі, ВАХ якого апроксимована полігонально, $u(t) = U_0 + U_m \cos \alpha \omega t$. Який буде кут відсічки θ , якщо $U_0 = U_m$ і $U_0 = 0,5U_m$?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы / С.И. Баскаков – 3-е изд. – М.: Высшая школа, 2000. – 462 с.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – 9-е изд., перераб. и доп./ Л.А. Бессонов – М.: Высшая школа, 1996. – 638 с.
3. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы – 4-е изд. / И.С. Гоноровский – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
4. Заездный А.М. Теория нелинейных электрических цепей/ А.М. Заездный, В.Ф. Кушнир, Б.А. Ферсман – М.: Связь, 1968. – 400 с.
5. Кушнир В.Ф. Теория нелинейных электрических цепей / Кушнир В.Ф., Ферсман Б.А. – М.: Связь, 1974. – 383 с.

ДОДАТОК 1

Функції Берга

$\theta, ^\circ$	$\alpha_0(\theta)$	$\alpha_1(\theta)$	$\alpha_2(\theta)$	$\alpha_3(\theta)$	$\alpha_4(\theta)$	$\alpha_5(\theta)$
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5	0,019	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037
10	0,037	0,073	0,073	0,072	0,070	0,069
15	0,055	0,110	0,108	0,104	0,099	0,093
20	0,074	0,146	0,141	0,132	0,121	0,108
25	0,092	0,181	0,171	0,155	0,134	0,111
30	0,111	0,215	0,198	0,171	0,139	0,103
35	0,129	0,248	0,221	0,181	0,134	0,086
40	0,147	0,280	0,241	0,185	0,122	0,063
45	0,165	0,310	0,256	0,181	0,103	0,036
50	0,183	0,339	0,267	0,172	0,079	0,011
55	0,200	0,366	0,274	0,157	0,053	-0,012
60	0,218	0,391	0,276	0,138	0,028	-0,028
65	0,235	0,414	0,274	0,116	0,004	-0,036
70	0,252	0,436	0,268	0,092	-0,016	-0,038
75	0,269	0,455	0,258	0,067	-0,031	-0,033
80	0,286	0,472	0,245	0,043	-0,040	-0,024
85	0,302	0,487	0,230	0,020	-0,044	-0,012
90	0,318	0,500	0,212	0,000	-0,042	0,000
95	0,334	0,510	0,193	-0,017	-0,037	0,010
100	0,349	0,520	0,173	-0,030	-0,028	0,017
105	0,364	0,526	0,152	-0,039	-0,018	0,019
110	0,379	0,531	0,131	-0,045	-0,008	0,019
115	0,393	0,534	0,111	-0,047	0,002	0,015
120	0,406	0,536	0,092	-0,046	0,009	0,009
125	0,419	0,536	0,074	-0,043	0,014	0,003
130	0,431	0,534	0,058	-0,037	0,017	-0,002
135	0,443	0,532	0,044	-0,031	0,018	-0,006
140	0,453	0,528	0,032	-0,024	0,016	-0,008
145	0,463	0,525	0,022	-0,018	0,013	-0,009
150	0,472	0,520	0,014	-0,012	0,010	-0,007
155	0,480	0,515	0,008	-0,008	0,007	-0,005
160	0,487	0,510	0,004	-0,004	0,004	-0,003
165	0,492	0,506	0,002	-0,002	0,002	-0,002
170	0,497	0,502	0,001	-0,001	0,001	-0,001
175	0,497	0,500	0,000	0,000	0,000	0,000
180	0,500	0,500	0,000	0,000	0,000	0,000

Зміст

Вступ	3
Лабораторна робота 1	4
Лабораторна робота 2	18
Лабораторна робота 3	26
Лабораторна робота 4	36
Список літератури	48
Додаток. Функції Берга	49

Для приміток

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
з курсу «НЕЛІНІЙНІ ТА ПАРАМЕТРИЧНІ ЯВИЩА В РАДІОТЕХНІЦІ»

для студентів факультету "Автоматика та приладобудування"

Укладачі: КОЗЛОВ Сергій Сергійович
АНДРЕЄВ Олександр Євгенович
РИМАР Сергій Іванович

Відповідальний за випуск В.В. Лізогуб

Роботу до видання рекомендувала О.Г. Глебова

В авторській редакції

План 2012 р., поз. 82

Підп. до друку Формат 60x84 1/16. Папір друк. №2. Друк – ризографія.
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 3,3. Обл.-вид. арк. 4,1.
Тираж 50 прим. Зам. № . Ціна договірною.

Видавничий центр НТУ «ХП».
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 3657 від 24.12.2009 р.
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Друкарня НТУ «ХП». 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21